CAES シャンペン現象の数値解析*
(第2報, 実機評価)大川 富雄^{*1} 田中 伸和^{*2}, 山本 亮介^{*2}
松井 剛一^{*3}, 文字 秀明^{*3}Numerical Simulation of CAES Champagne Effect
(2nd Report, Preliminary Calculation for Plant Design)Tomio OKAWA, Nobukazu TANAKA, Ryosuke YAMAMOTO
Goichi MATSUI and Hideaki MONJI

Evaluation of champagne effect is indispensable for successful commercialization of a compressed air energy storage (CAES) system which is one of the most promising candidates of energy storage system. In the present study, we examined optimum design of the CAES system through numerical calculations of the champagne effect based on a two-fluid model. As a result, the following conclusions were obtained. (1) Charging rate of air into a lower reservoir should be gradually changed during startup and shutdown periods to avoid pressure oscillation in the lower reservoir. (2) If the water level in the lower reservoir is too low when the charging is finished, the inertial force makes the water level enter into the U-bend, which also induces the pressure oscillation in the lower reservoir. (3) If appropriate procedures are adopted during the startup and shutdown period of air charging system, the water level in the lower reservoir does not enter into the U-bend. The construction cost can hence be reduced by shortening the U-bend.

Key Words: CAES Champagne Effect, Numerical Simulation, Optimum Design, Two-Fluid Model

1. 緒 言

圧縮空気エネルギー貯蔵(CAES: Compressed Air Energy Storage)システムを備えたガスタービン発電は、揚水発電に次ぐ次世代の電力貯蔵技術として期待されている。本システムでは、安価な夜間電力を利用して深度地下に設置される空気貯蔵槽に圧縮空気を貯蔵し、ピーク電力時にこれを利用してガスタービン発電を行う。圧縮空気を一定の圧力で取り出すため、空気貯蔵槽は地上の貯水池と水シャフトおよび U ベンドと呼ばれる配管により連結される。したがって、空気貯蔵槽では圧縮空気と水が高圧下で長時間接触するため、空気の一部は水中に溶解することになる。この結果、圧縮空気貯蔵時に空気溶解水が水シャフト内を上昇すると、静圧の低下により溶存空気が水中に放出される。これを CAES シャンペン現象と呼ぶ。CAES シャンペン現象が生じると水シャフト内の流体の平均密度が低下するため、空気貯蔵槽内の水位が低下する。そして、もし空気貯蔵槽内の水位が U ベンドの下部にまで達すると、

貯蔵した圧縮空気が水シャフトを通過して系外に大量に抜けてしまう可能性がある(ブローアウト)。ブローアウトを避けるためには、シートや油膜などを用いて貯蔵槽内で水と空気が直接接触することを避けるという方策も考えられるが、長期健全性や環境上の問題により適当な手法は現時点では考案されていない。したがって CAES システムの実用化のためには、シャンペン現象を正確に予測することによりブローアウトを生じない設計・運転方法を確立することが必要となる。このため、CAES シャンペン現象予測手法の開発は、CAES システムを実用化するために最も重要な課題の一つとして位置付けられている。

CAES システムの合理化設計に資するため、著者らは二流体モデルに基づく CAES シャンペン現象解析プログラムを開発するとともに、数値解の精度検証用の実験データを取得してきた^(1,2)。さらに実験解析を実施し、液相流量や空気貯蔵槽内水位等の CAES システムの設計で特に重要な物理量の挙動は、本解析プログラムにより工学的に妥当な精度で再現できることを確認した⁽³⁾。したがって本解析プログラムは、シャンペン現象発生時におけるシステムの全体的な挙動を予測し、CAES システムの成立性および設計・運転方法の最適化等について検討するためのツ

* 原稿受付 1998 年 2 月 12 日。

^{*1} 正員, (財)電力中央研究所(〒201-8511 狛江市岩戸北 2-11-1)。^{*2} (財)電力中央研究所(〒270-1194 我孫子市我孫子 1646)。^{*3} 正員, 筑波大学構造工学系(〒305-8573 つくば市天王台 1-1-1)。

ールとして有用と考えられる。本報では、上記解析プログラムを用いて実機条件におけるシャンペン現象を解析し、圧縮空気封入システムの起動・停止時の運転方法および最適な U ベンド長さについて検討した結果を報告する。

2. 支配方程式と計算条件

2・1 支配方程式 以下に解析モデルの概略を示す。詳細については前報を参照されたい⁽³⁾。系内の流体は等温で温度変化はなく、気体が溶解しても液体の体積は変化しないものと仮定し、解析には二流体モデルに基づく以下の基礎方程式を用いた。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_G \rho_G) + \frac{\partial}{\partial z}(\alpha_G \rho_G u_G) = \Gamma \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_L \rho_L) + \frac{\partial}{\partial z}(\alpha_L \rho_L u_L) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_G}{\partial t} + u_G \frac{\partial u_G}{\partial z} + \frac{1}{\rho_G} \frac{\partial P}{\partial z} + M_G = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_L}{\partial t} + u_L \frac{\partial u_L}{\partial z} + \frac{1}{\rho_L} \frac{\partial P}{\partial z} + M_L = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_L S) + \frac{\partial}{\partial z}(\alpha_L S u_G) = -\Gamma \quad (5)$$

ここで、 t は時刻、 z は流れ方向位置、 α は体積率、 ρ は密度、 u は速度、 P は圧力、 S は液相中の気体濃度、 Γ は気体の放出速度、 M は外力、添字の G, L は各々気相と液相を表す。外力 M_G, M_L には、重力、界面せん断力、壁面せん断力を考慮した。口径が大きいため、高ボイド率条件でも水シャフト内部では気泡流に近い流動様式が生じることが実験により観察されたので⁽²⁾、界面せん断力は気泡流の式⁽⁴⁾により評価した。壁面せん断力はブラシウスの式により評価し、バンド部および急縮・急拡大による圧損を別途考慮した。気体放出速度 Γ は界面積濃度 a_{int} および過飽和度(局所空気濃度と飽和濃度の差)に比例すると仮定し、次式で与えた。

$$\Gamma = k_L a_{int} (S - \rho_L P) \quad (6)$$

ここで、 k_L は物質移動係数、 Λ はヘンリー定数である。

2・2 計算条件 700 m 級の CAES システムを図 1 のようにモデル化した。なお図中で*を付したものは、後で行う解析結果の出力に用いた物理量である。空気貯蔵槽は高さ 12 m、体積 $2 \times 10^5 \text{ m}^3$ で、空気封入開始時における水位は 11.5 m とする。U ベンドの直管部の長さは 67.5 m、曲がり部の曲率半径は 10 m とする。水シャフトの長さは 612 m、貯水池の水位は 12 m とする。なお、水シャフトおよび U ベンドの内径は 5 m とした。空気封入速度 Q_{IN} は定常状態で 440 kg/s とした。また、空気封入システムの

Fig. 1 Configuration of CAES system.

起動・停止時における空気封入速度は線形に変化するものとし、定常値に達するまでの時間を各々 T_{ST} 、 T_{SH} とした。初期条件では、解析領域の全域で $u_G = u_L = 0 \text{ m/s}$ 、 $\alpha_G = 10^{-5}$ とし、空気濃度は空気貯蔵槽内では飽和濃度、U ベンドおよび水シャフトでは 0 とした。なお初期条件として与える α_G の値は、十分に小さくれば解析結果にほとんど影響しないことを前報で確認している。境界条件は、空気貯蔵槽気相部の圧力と水位を空気の流入量と水の流出量から計算して与え、貯水池の水位および圧力は一定とした。気泡径 d は、 $\alpha_G \geq 0.1$ のとき 7 mm、 $\alpha_G \leq 0.1$ のときには気泡の体積が α_G に比例するものとして求めた^(2,5)。物質移動係数 k_L は、前報で行ったパラメーター解析の結果より 0.4 mm/s とした⁽³⁾。

3. 圧縮空気封入システムの起動・停止

3・1 起動方法 圧縮空気封入システムの最適な起動方法を検討するため、同システムの起動時間(T_{ST})をパラメータとして解析を実施した。圧縮空気封入開始直後からの水シャフト下部における液相流量および空気貯蔵槽内水位の時間変化を各々図 2 (a), (b) に示す(重なりを避けるため、図 2(a)では一定値を差し引いた値を示している場合がある)。図 2 (a)より空気封入速度を短時間で定常値まで増加させた場合には($T_{ST} = 1 \text{ min}$)、貯蔵槽内気相部をばね、液体を質量体と見立てることにより、ばね-質量系の振動に類似した振動が生じ、液相流量が大きく変動することがわかる。一方 T_{ST} を 10 分以上に設定した場合には、振動の振幅が大きく減少している。ばね-質量系の振動が生じると貯蔵槽内気相部の体積が変化するため、空気貯蔵槽内の圧力が変動する。したがって、ばね-質量系の振動はコンプレッサーによる圧縮空気封入特性およびシステムの健

(a) Water flow rate at shaft bottom

(b) Water level in lower reservoir

Fig. 2 Effects of startup time of air charging system.

全性に悪影響を及ぼす可能性がある。したがって本研究で検討対象としたシステムでは、圧縮空気封入開始時におけるばね-質量系の振動を避けるため、空気封入システムの起動に10分程度以上の時間をかけて空気封入速度を徐々に増加させる必要があることがわかった。

また図2(a)より、空気封入速度が定常値に達して暫くすると水シャフト部でシャンペン現象を生じるため、液相流量が増加してピークを形成することがわかる。しかし、図2(b)に示されるように、この時の空気貯蔵槽内の水位の低下速度はほとんど変化しない。したがって実機条件では、シャンペン現象開始初期に生じる流量の増加によりブローアウトが引き起こされる可能性は低いと考えられる。

3・2 停止方法 圧縮空気封入システムの最適な停止方法について検討するため、 $T_{ST}=10\text{min}$ とし、圧縮空気封入システムの停止時間(T_{SH})および空気封入停止時における空気貯蔵槽内水位(H_{FN})をパラメーターとして解析を実施した。まず $H_{FN}=0.5\text{m}$ とし、 $T_{SH}=1, 10, 20\text{min}$ としたときの水シャフト下部における液相流量および空気貯蔵槽内水位の解析結果を各々図3(a), (b)に示す。図3(a)より $T_{SH}=1\text{min}$ とした場合には、空気封入停止時にもばね-質量系の振動により液相流量は大きく変動することがわかる。一方、 T_{SH} を10分以上とすれば液相流量の変動を小さく抑えられることがわかる。したがって液相流量の振動を避ける

(a) Water flow rate at shaft bottom

(b) Water level in lower reservoir

Fig. 3 Effects of shutdown time of air charging system. ($H_{FN} = 0.5\text{ m}$)

ためには、空気封入システムの停止時にも10分程度以上の時間をかけて封入速度を徐々に減少させる必要があることがわかる。

なお図3(b)より、空気貯蔵槽内の水位は T_{SH} の値にかかわらず空気封入開始後から緩やかに減少し、空気封入停止後約50分で定常となることがわかる。したがって、 $H_{FN} = 0.5\text{ m}$ とした場合には圧縮空気封入開始から停止までのすべての時刻で空気貯蔵槽内水位は十分に余裕があり、実機条件ではシャンペン現象に起因してブローアウトが生じる可能性は低いと考えられる。

次に、 $H_{FN} = 0\text{ m}$, $T_{SH} = 20\text{ min}$ とした場合の同様の解析結果を図4(a), (b)に示す。図4(b)より、 $H_{FN} = 0\text{ m}$ とした場合には慣性力により空気封入停止後に空気貯蔵槽内水位がUベンド部に侵入し、ブローアウトが生じやすい状況になることがわかる。また図4(a)に示すように、この場合には $T_{SH} = 20\text{ min}$ としたにもかかわらず、液相流量は圧縮空気封入システム停止後に大きく変動する。したがって、ブローアウトを確実に回避し、空気封入停止時における液相流量の振動を避けるためには、封入速度を10分程度の時間で徐々に減少させるとともに、貯蔵槽内の水位が0.5m程度となった時点で封入を停止する必要があることがわかった。

(a) Water flow rate at shaft bottom

(a) Void fraction at shaft top

(b) Water level in lower reservoir

(b) Water flow rate at shaft bottom

Fig. 4 Effects of shutdown time of air charging system.
($H_{FN} = 0.0$ m)

4. 水シャフト内初期空気濃度の影響

以上に示した計算では、Uベンドおよび水シャフト内の初期空気濃度を0に設定した。しかし、運転を継続するに従い空気封入開始時におけるシャフト内の空気濃度は上昇すると予想される。そこで、シャフト内初期空気濃度の影響を調べておく。 $T_{ST} = T_{SH} = 10$ min, $H_{FN} = 0.5$ mとし、Uベンドおよび水シャフト内の初期空気濃度を0とした場合 (Case A)と飽和濃度とした場合 (Case B)の解析結果を図5 (a)-(d)に示す。Case Aでは、貯蔵槽内の空気溶解水がシャフト内を上昇し飽和圧力以下となったときに空気の放出を開始する。このため、水シャフト上部におけるボイド率は貯蔵槽内の空気溶解水が到達する前後で急激に増加している。この結果、液相流量は一時大きく増加し、流量ピークを形成する。一方Case Bでは、空気封入開始直後から徐々に空気が放出されるため、流量ピークが大きく減少し、この時の空気貯蔵槽内の圧力低下速度も緩やかになる。液相流量がほぼ定常となった後は、初期条件により解析結果はほとんど変化していない。したがって、シャンペン現象開始時における液相流量の増加がより急激であることから、Case Aの方がシャンペン現象の影響をより厳しく評価することがわかる。ただし、Case Aで液相流量がピーク値

(c) Pressure in lower reservoir

(d) Water level in lower reservoir

Fig. 5 Effects of initial air concentration in water shaft.

となったときでも空気貯蔵槽内の水位の低下速度は初期空気濃度によりほとんど変化していない。したがって、水シャフト内部における初期空気濃度が変化した場合でも、実機ではシャンペン現象に起因するブローアウトは生じにくいと予想される。

5. 最適 U ベンド長さ

空気封入システムの起動・停止時に本研究で推奨する方法($T_{ST} = T_{SH} = 10$ min, $H_{FN} = 0.5$ m)を採用すれば、空気封入開始から停止までのすべての時刻で空気貯蔵槽内の水位が U ベンド部に侵入することはない。したがって、U ベンド部の長さを大幅に短縮できる可能性がある。そこで、これまでの解析で 67.5 m としてきた U ベンド直管部の長さ Z_{UB} を 0 m として、図 5 と同様の計算を行った結果を図 6 に示す。なおより厳しい条件で評価するため、水シャフトおよび U ベンドにおける初期空気濃度は 0 とした。図 5 と図 6 を比較すると、U ベンド直管部を削除することにより解析結果はほとんど変化しないことがわかる。したがって、本研究で推奨する起動・停止方法を採用すれば、貯蔵槽圧力および液相流量の振動を大きく低減でき運転性が向上するばかりでなく、U 字管直管部の削除が可能となるため一基あたり数億円程度の建設コストの削減が期待できる。

6. 結 言

二流体モデルに基づく CAES シャンペン現象解析プログラムにより 700m 級 CAES システムにおけるシャンペン現象を解析し、同システムの設計および運転方法の合理化のための方策を検討した。以下に、本研究で得られた主な結論を整理しておく。

- (1) 圧縮空気封入システムの起動・停止時に空気封入速度を急激に変化させると、ばね-質量系の振動に類似した振動が生じる。この結果、水シャフトにおける液相流量が大きく変動するため、システムの運転性・健全性に悪影響を及ぼす可能性がある。したがって、ばね-質量系の振動を避けるため、空気封入システムの起動・停止には 10 分程度以上の時間をかけて空気封入速度を徐々に変化させる必要がある。
- (2) 空気貯蔵槽内の水位が 0m となるまで空気の封入を継続すると、貯蔵槽内の水位は空気封入停止後に慣性力により U ベンド部に侵入する。この結果、ブローアウトが生じる危険性が高まるとともに、空気封入速度を急激に変化させた場合と同様の振動が生じる。したがって、ブローアウトを確実に回避するとともに液相流量の振動を避けるためには、空気貯蔵槽内の水位が 0.5m 程度で空気封入を停止する必要がある。

(a) Void fraction at shaft top

(b) Water flow rate at shaft bottom

(c) Pressure in lower reservoir

(d) Water level in lower reservoir

Fig. 6 Calculated results when U-bend is shortened.

- (3) 以上に示した起動・停止方法を採用すれば、通常運転運転時において空気貯蔵槽内に形成される水面はUベンド部には侵入しない。したがって、Uベンドの直管部を削除できるため、建設コストの低減が期待できる。

謝 辞

神崎潔氏(電力計算センター)には計算を行うにあたり多大な協力をいただいた。また、片岡勲先生(阪大)には実機解析における初期条件の与え方についての的確な助言をいただいた。ここに記し、両氏に深く感謝する。

参 考 文 献

- (1) G. Matsui et al., Numerical simulation of champagne effect in compressed air energy storage system, Proc. Japan-US Seminar on Two-Phase Flow Dynamics (1996) 163-169.
 - (2) H. Kumamaru et al., Compressed air energy storage system two-phase flow experiment, Proc. Int. Conf. Nucl. Eng., Vol. 1, Part B (1996) 669-674.
 - (3) 大川富雄他, CAES シャンペン現象の数値解析 (第1報, 解析モデルの開発と検証), 機論 B, Vol. 64, No. 621 (1998) 1398-1404.
 - (4) 富山明男他, 気泡の抗力係数に関する研究 (第1報, 静止液中単一気泡の抗力係数), 機論 B, Vol. 61, No. 587 (1995) 2357-2364.
 - (5) T. Okawa et al., Flow structure of bubble-induced natural-circulation, Proc. Int. Conf. Nucl. Eng., ICONE5-2309 (1997) 1-10.
-